

正規圧密粘土の平均主応力一定試験結果について

京都大学防災研究所 正員 大槻正紀

はじめに 一般的な応力条件下にある土の応力～ひずみ関係の解析において、平均主応力一定条件下の土の変形と、応力比一定条件下の土の変形は、その基本となるものである。ここでは、2種類の粘性土を用い、三軸圧縮条件のもとに、平均主応力を一定にしてせん断試験を行なった。このときの変形を向けき比と偏差ひずみに分けて解析を行ない、これらを表わす実験式を示し、若干の考察を行なった。

実験式と各係数値の決定方法 試験結果の解析に当たっては、つぎのような応力、ひずみパラメータを用いる。

$$\sigma_m = p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3), \quad q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad r = \frac{q}{p}, \quad \epsilon_a = \epsilon_1 - \frac{1}{3}\epsilon_v = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3)$$

正規圧密された飽和粘土を平均主応力  $p$  一定のもとに、せん断応力を増加しながらせん断したときの向けき比  $e$ 、偏差ひずみ  $\epsilon_a$  を(1)式、(2)式の実験式で表わす。(1)式は、 $p$ 一定でせん断したときの供試体の体積は、せん断応力の増加とともに、初め圧縮し、あるせん断応力を越えると膨張することを示している。

いま、最大圧縮点の応力比  $r$  を  $r_m$  とするとき、 $x = r/r_m$  である。 $B, \Delta e_m, D, E$  は実験的に決めるべき定数である。また、(1)式中の  $F(x)$  は(3)式で示されるものであるが、図-1に示すように、 $x=1$  で最大値1をもつ関数である。図-1より、係数  $B$  はこのタイレタンシー曲線の形状を決めるパラメータである。つぎに、各係数値の決定方法について述べる。(1)、(3)式より(4)式を得る。この式を用いると  $\log(-\frac{1}{1-x} \frac{de}{dx}) \sim x$  プロットの勾配、切片より、 $B, \Delta e_m$  を決定することができる。また、(2)式より(5)式を得る。また、(2)式を微分することにより(6)式を得る。(5)式は  $r=0$  よりせん断した試験の係数  $D, E$  の決定に用い、異方圧密した場合のように  $r$  がゼロ以外の状態からせん断したときの係数  $D, E$  の決定には、(6)式を用いる。

つぎに、 $p$ 一定で応力比  $r$  を減少させるときの向けき比、偏差ひずみを、それを表(7)、(8)式のように表わす。ここに  $r_c$  は、応力比を減少

$$e = e_0 - \Delta e_m F(x) \tag{1}$$

$$\epsilon_a = D + E r / (1 - E r) \tag{2}$$

$$F(x) = A \{ (B+1-x) \exp(x/B) - (B+1) \} \tag{3}$$

$$\therefore 1/A = B \exp(1/B) - (B+1)$$

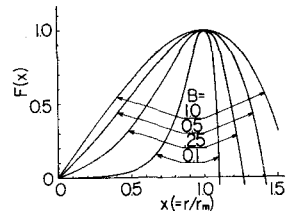


図-1  $F(x) \sim x$  関係

$$\ln\left(-\frac{1}{1-x} \frac{de}{dx}\right) = \ln \frac{A \Delta e_m}{B} + \frac{x}{B} \tag{4}$$

$$\frac{\epsilon_a}{r} = D + E \epsilon_a \tag{5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{d\epsilon_a/dr}} = \frac{1}{\sqrt{D}} - \frac{E}{\sqrt{D}} r \tag{6}$$

$$e = e_c - \Delta e_0' \ln \frac{r+C_m}{r_c+C_m} \tag{7}$$

$$\therefore \Delta e_0' = \frac{0.434(-\delta e_0)}{\log_{10} \{C_m / (r_c + C_m)\}}$$

させ始めたときの  $r$ ,  $(-\delta e)$  は  $r$  を  $r_0$  からゼロまで減少させたときの割けき比の減少量,  $E_{d0}$  はそのときの偏差ひずみである。また,  $C_m, C_d$  はそれぞれ  $e \sim r$  曲線,  $E_d \sim r$  曲線の形状を表わす係数である。(7), (8)式において,  $r$  が減少するときの割けき比の変化, 偏差ひずみはそれぞれ対数関数で表わしたが, このときの形状係数  $C_m, C_d$  はつぎのように決める。すなわち, (9)式で表わされた  $e$  を考え ( $e_0$  は  $r=0$  のときの  $e$ ),  $r=r_0/2$  のときの  $e$  を  $e_{1/2}$  とすると, (10)式を得る。(10)式より  $e_{1/2}/e_0$  は, 各  $r_0$  に対して  $C$  の関数となる。いま, 種々の  $r_0$  に対して  $e_{1/2}/e_0 \sim C$  の関係をおぼえておけば, 実験より  $e_{1/2}/e_0$  を求めることにより, 形状係数  $C$  が求まる。図-2 は種々の初期応力比  $r_0 = (q/p)_0$  に対して  $e_{1/2}/e_0 \sim C$  の関係を計算したものである。

$$E_d = E_{d0} \ln \frac{r+C_d}{r_0+C_d} \quad (8)$$

$$\text{よって, } E_{d0} = \frac{2.434 E_d}{\log_{10} \left\{ C_d (r_0+C_d) \right\}}$$

$$e = \frac{2.434 E_0}{\log_{10} \left\{ C (r_0+C) \right\}} \ln \frac{r+C}{r_0+C} \quad (9)$$

$$\frac{e_{1/2}}{e_0} = \ln \frac{r_0/2+C}{r_0+C} / \ln \frac{C}{r_0+C} \quad (10)$$

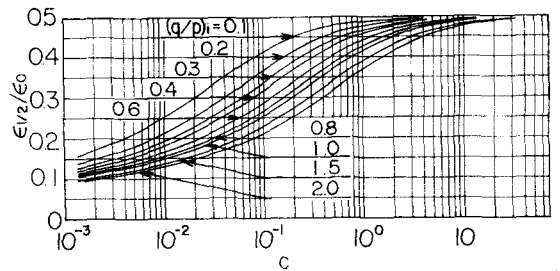


図-2 形状係数  $C_m, C_d$  の決定

試験結果の解析 試験に用いた試料は, 市販粉末粘土(藤森粘土, ここでは, F試料と称す)と倉敷市水島の埋立地より採取した乱雑な試料(M試料)の2種類である。試験は, 供試体を所定の平均主応力  $p$  まで等方又は異方圧密した後,  $p$  一定条件のもとに応力制御によりせん断した。F試料は短期間の試験と長期間の試験とを行っている。前者はせん断応力増分比  $\delta \sigma/p = 0.125$  とし, 約1日間毎に載荷又は除荷していくもの(ここではF(ST)試験と称す)で, 後者は種々の  $\delta \sigma/p$  を用い, 約16日間毎に載荷している(F(LT)試験と称す)。またM試料は,  $\delta \sigma/p = 0.16$  の約10日間毎に載荷している。図-3, 4, 5はF(LT)試験の平均主応力  $\sigma_m$  が 1, 2, 4 kg/cm<sup>2</sup> の場合の試験結果である。これらの試験では,  $\delta \sigma/p$  を種々にかえておいたが, その影響は無視できる。図-6のプロットは,  $r_0 = 0.75$  より  $p = 2.0 \text{ kg/cm}^2$  (一定)のもとに  $r$  を減少させたときの試験結果を示している。 $(-\delta e)$ ,  $(-E_d)$  は,  $r$  の減少とともに単調に増加している。図-3~6

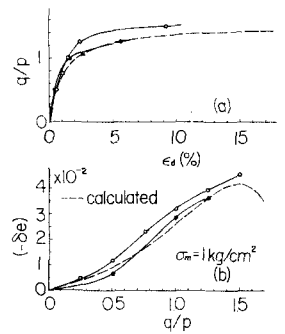


図-3  $E_d, (-\delta e) \sim \delta \sigma/p$  の関係

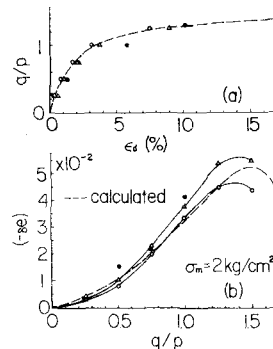


図-4  $E_d, (-\delta e) \sim \delta \sigma/p$  の関係

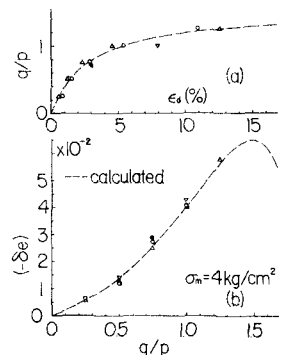


図-5  $E_d, (-\delta e) \sim \delta \sigma/p$  の関係

の破線は、後に示す係数値を用いて計算した計算曲線である。  
 つきに、各係数値と平均応力  $p$  の関係を示す。図-7は、各  
 試験結果について、(4)式を用いて最小二乗法により決定した  $B$   
 の値を  $p$  に対してプロットしたものである。この図より、 $B$  は  
 $p$  に無関係に一定とみなせる。図-8は、(4)式の  $\Delta e_m$  と  $p$  の関  
 係を両対数紙上にプロットしたものである。ここに  $\Delta e_m$  は  $(-de)$   
 $\sim$   $\delta p$  関係において最大値をもちものけるれを用い、最大値の  
 ないものは(4)式の関係より求めた。この図より、 $\Delta e_m$  は両対数  
 紙上で  $p$  に対して直線的に増加するとした。図-9は、(5)式の  
 関係より求めた  $D$  と  $p$  の関係を両対数紙上に示したものである。  
 Duncanら<sup>2)</sup>に従ってこの関係を直線とした。図-10は同じ(5)式

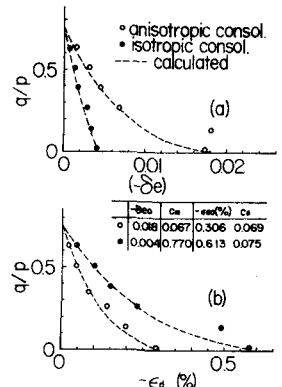


図-6  $e_a, (-de) \sim \delta p$  関係

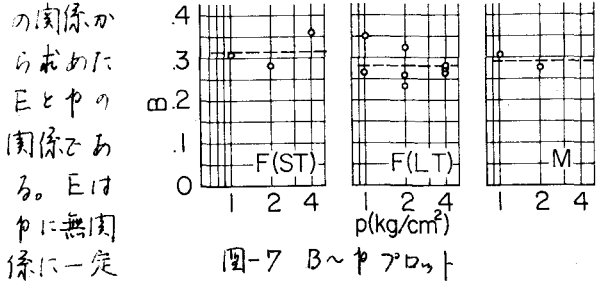


図-7  $B \sim p$  プロット

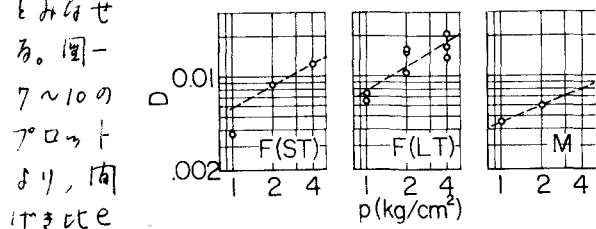


図-9  $D \sim p$  プロット

の関係を  
 ら求めた  
 $E$  と  $p$  の  
 関係であ  
 る。 $E$  は  
 $p$  に無関  
 係に一定  
 とみなせ  
 る。図-  
 7~10の  
 プロット  
 より、同  
 じき比  $e$   
 偏差  $U$  は

み  $e_a$  は(11),(12)式のように表わされる。こ  
 こに、 $k_m$ ,  $m$ ,  $k_d$ ,  $n$  は定数であり、 $p_a$  は  
 基準圧力である。表-1に各試料に対して求  
 めた各係数の値を示す。図-3, 4, 5の破  
 線は、これらの係数値を用い  
 て行なった計算曲線である。  
 図-6中の表に、応力比  $r$  が  
 減少する場合の試験について、  
 $(-de)$ ,  $(-e_d)$  および図-2より求めた  $C_m$ ,  $C_a$  の値を示している。また、これらの係  
 数値を用いたときの計算曲線を同図中に破線を示した。

考察 図-11は、F試料を所定の応力比  $r$  で  $p = 2 \text{ kg/cm}^2$  まで異方圧密した後、 $p$  一定  
 で  $r$  を増加してせん断したときの各係数値を異方圧密時の応力比  $0.1/0.5$  に対してプロット

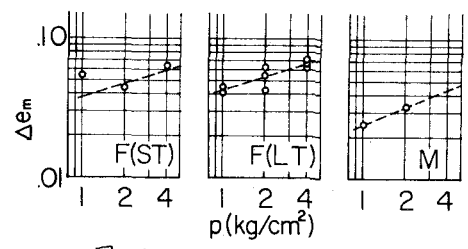


図-8  $\Delta e_m \sim p$  プロット

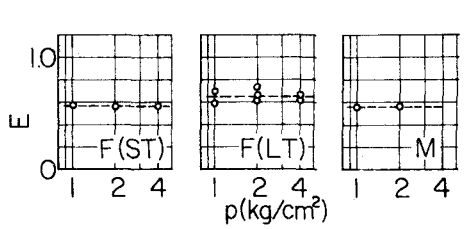


図-10  $E \sim p$  プロット

$$e = e_0 - k_m p_a \left(\frac{p}{p_a}\right)^m F(x) \quad (11)$$

$$e_a = k_d p_a \left(\frac{p}{p_a}\right)^n \frac{r}{1 - Er} \quad (12)$$

表-1 各係数の値

Sample	$r_m$	$k_d \times 10^{-2}$	$n$	$E$	$k_m$	$m$	$B$
F(ST)	1.50	0.580	0.62	0.567	0.038	0.316	0.315
F(LT)	1.50	0.760	0.62	0.653	0.042	0.316	0.280
M	1.48	0.450	0.45	0.560	0.024	0.417	0.291

したものである。ここで、D、Eは、(6)式を用いて求め、 $\Delta e_m$ 、Bは、(4)式より求めたものである。この間より係数D、 $\Delta e_m$ は異方圧密時の応力比 $\sigma_1/\sigma_3$ の増加とともに減少し、係数E、Bは一定とみられる。図-12は、応力履歴による影響を示したものである。すなわち、(a)図に示すように、3種類の応力経路を与えて供試体を $p=2\text{ kg/cm}^2$ 、 $r=0.75$ の応力状態にした後、 $p$ ( $=2\text{ kg/cm}^2$ )一定試験を行った。(b)、(c)図よりわかるように、正規圧密状態にある2つの試験(O印と $\Delta$ 印)の $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_v \sim r$ 曲線はほとんど同じになっているが、過圧密状態の供試体( $\nabla$ 印)では、これらと大きく異なった挙動を示している。最後に、 $p$ 一定試験に対して、Rowe<sup>2)</sup>、Roscoeら<sup>3)</sup>、松岡<sup>4)</sup>により応力比とひずみ増分比の関係が与えられているが、これらの相互関係についてみる。図-13は各理論の応力比とひずみ増分比の関係を $\sigma_1/\sigma_3$ と $(1-\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_s)$ の関係を示した。これらの理論曲線作成に当たっては、F(LT)試験の $p=2\text{ kg/cm}^2$ の実験結果にもっともよく合うように各理論における係数値を決めている。すなわち、Rowe<sup>2)</sup>においては、 $\phi_f=34.2^\circ$ 、Roscoeら<sup>3)</sup>においては、 $M=1.28$ 、松岡<sup>4)</sup>においては、 $\mu=0.29$ 、 $\lambda=1/10$ としている。この図に同時に上に示した実験式より求めた関係も示している。この図からわかるように、各理論曲線、実験曲線ともよく合う範囲ではあまり大きな差異はない。

おわりに 平均主応力一定条件下の土の変形挙動は、土の変形解折において重要であるが、ここでは正規圧密粘土について、その挙動をあらわす実験式を示し、考察を行った。今後、過圧密粘土についても同様の検討を行なう、ていきたいと考えている。

謝辞: 御指導頂いた京都大学防災研究所 柴田 徹 教授に心よりの謝意を表します。また、M試料は高永真生氏(川崎製鉄)より提供頂いたものであり、実験は、防災研究所、清水博樹技官、末岡徹氏(大成建設)、伊藤文平氏(神戸市)ともに行なったものである。各氏に対し、心よりの謝意を表するるのであります。

### 引用文献

- 1) Duncan & Chang (1970): Proc. ASCE Vol. 96, SM5, PP1629-1653
- 2) Rowe (1971): Roscoe Memorial Symp. G. T. Foulis & Co. LTD. PP143-194
- 3) Roscoe, Schofield & Thurairajah (1963): Geotech. Vol. 13, PP211-240
- 4) 松岡 (1974): Soils and Foundations, Vol. 14, PP77-87

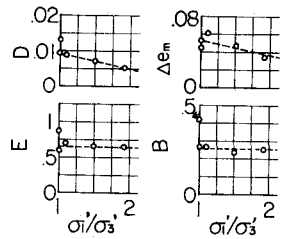


図-11 異方圧密試料の各係数の値

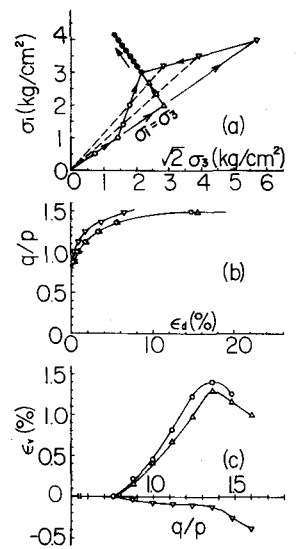


図-12 応力履歴の影響

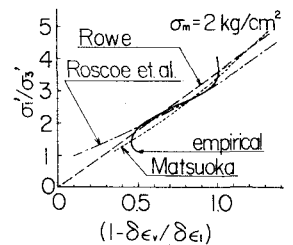


図-13 各理論の比較